

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА "ГАЗ, НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ — ЭДЖ" В ПРЯМОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ PbJ_2

М.С.Бродин, И.В.Блонский, В.В.Тищенко

Впервые для прямозонного полупроводника экспериментально определена фазовая диаграмма перехода электронов и дырок в конденсированное состояние.

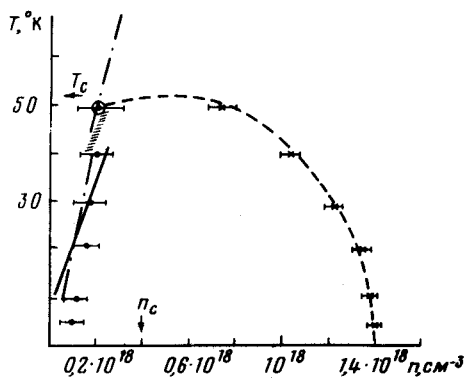
Результаты ряда экспериментальных работ указывают на возможность расслоения однородной системы неравновесных носителей в прямозонных полярных полупроводниках на газовую и более плотную жидкую фазы [1]. Энергетическая стабильность электронно-дырочного конденсата в таких соединениях достигается за счет взаимодействия носителей с оптическими фононами [2].

Фазовый переход, ведущий к образованию электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), отличается от обычного (например, пар — вода), тем, что даже после его завершения нарушено условие равенства химических потенциалов исходной и образованной фаз. Это отклонение от термодинамического равновесия возникает из-за конечного времени жизни носителей (τ), образующих ЭДЖ и проявляется в наибольшей степени в области температур далеких от критической (T_c). Поэтому следует ожидать, что в прямозонных полупроводниках ($\tau \sim 10^{-10}$ сек) область термодинамической неустойчивости однородной системы электронов и дырок окажется чрезвычайно узкой.

В настоящем сообщении изложены результаты исследований, цель которых состояла в определении фазовой диаграммы для конденсации носителей в слоистом прямозонном полупроводнике PbJ_2 [3].

Изучалось рекомбинационное излучение PbJ_2 , возникающее при облучении N_2 -лазером (пиковая мощность 3,2 кВт, длительность импульса 10^{-8} сек). Запись спектров фотоэлектрическая с применением стробинтегратора. Эксперименты проводились на монокристаллах, находящихся или в жидком гелии, или в его парах, температура которых поддерживалась с точностью $\pm 0,05$ К.

Зависимость равновесной плотности ЭДЖ (n_0) от температуры определялась из спектров усиления (СУ) подобно работе [4]. СУ получены методом усиления спонтанной фотолюминесценции PbJ_2 [5]¹⁾. Подчеркнем, что наблюдаемое на эксперименте отрицательное поглощение в области полосы излучения ЭДЖ (L -полоса) и независимость ширины СУ от интенсивности возбуждения подтверждают существование электронно-дырочных капель (ЭДК) в PbJ_2 .



Фазовая диаграмма ЭДЖ в PbJ_2 . Кругом обведена точка нормировки порогов I_t на стандартную диаграмму фазового равновесия. Слева от заштрихованной области электроны не вырождены

Граница фазовой диаграммы со стороны газа находилась путем измерения пороговой плотности возбуждения (I_t), при которой в спектре спонтанной фотолюминесценции появлялась L -полоса. При таких измерениях, особенно в условиях поверхностного возбуждения, проблематичным является определение абсолютной плотности носителей в каждой температурной точке. Однако, учитывая закон соответственных состояний, можно нормировать экспериментальные значения I_t в области критической точки на универсальную диаграмму фазового равновесия и, допуская независимость коэффициента, связывающего I_t с плотностью носителей от температуры, завершить фазовую диаграмму.

Диаграмма фазового перехода с образованием ЭДЖ в PbJ_2 изображена на рисунке. Наилучшее совпадение экспериментальных точек, выражающих зависимость $n_0(T)$ (обозначены крестиками на рисунке) со стандартной фазовой диаграммой [6] (штриховая линия на рисунке) по-

¹⁾ Подробнее эти измерения будут описаны в другом месте.

лучена для $T_c = 52$ К. Значение критической плотности при этом $n_c = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Экспериментальная зависимость $n_o(T)$ в Рь J_2 вплоть до 25 К хорошо описывается выражением $n_o(T) = n_o(0) [1 - \delta_n (kT)^2]^{-1}$ ($\delta_n = 0,014 \text{ мэВ}^{-2}$), которое следует из теории Ландау для квантовой ферми-жидкости.

Экспериментально определенная граница фазовой диаграммы со стороны газа (черные точки на рисунке) сильно смещена относительно термодинамически равновесной (n_s) в область больших плотностей. Например, при $T = 4,2$ К степень пересыщения равна $\ln \frac{n_t}{n_s} = 10,8$ (n_t — пороговая концентрация появления ЭДЖ).

Интересно сравнить опытные значения $n_t(T)$ с теоретической кривой. Для построения последней мы воспользовались выражением для разности свободных энергий ($\Phi(\nu)$) сконденсировавшихся частиц и эквивалентным числом молекул газа (ν) [7].

Из условий $\partial\Phi/\partial\nu = 0$ и $\partial^2\Phi/\partial\nu^2 = 0$ была определена минимальная плотность носителей, при которой в Рь J_2 могут существовать капли ЭДЖ. Однако такое состояние системы флуктуационно неустойчиво и требуется дополнительное пересыщение. Практически в этих условиях теоретический порог конденсации определяется равенством термодинамических барьеров препятствующих образованию и разрушению ЭДЖ.

Совпадение теоретической зависимости $n_t(T)$ (сплошная линия на рисунке) с экспериментальной, скорее качественное, чем количественное. С нашей точки зрения основная причина этого связана с неидеальностью газа носителей в той концентрационной области, где возможна конденсация в прямозонных полупроводниках¹⁾. Окситон-экситонные соударения с учетом поляритонного характера газовой фазы могут приводить при одинаковой плотности к меньшему значению ее химического потенциала по сравнению с идеальным газом [8]. Ясно, что этот эффект лишь увеличит порог конденсации.

И, наконец, отметим, что экспериментальные точки $n_t(T)$ неплохо совпадают с линией перехода Мотта (штрих-пунктирная линия на рисунке) рассчитанной из условия $g a_{ex} = 1,19$ (g — длина экранирования, a_{ex} — боровский радиус экситона). Этот факт позволяет надеяться на незначительное "искажение" [9] полученной фазовой диаграммы.

Институт физики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
3 июня 1980 г.

Литература

- [1] В.Г.Лысенко, В.И.Ревенко, Т.Г.Тратас, В.В.Тимофеев. ЖЭТФ, 68, 335, 1975; T.Skettrup. Solid. State Comm., 23, 1741, 1977.
- [2] Л.В.Келдыш, А.П.Силин. ЖЭТФ, 69, 1053, 1975.
- [3] М.С.Бродин, И.В.Блонский, М.И.Страшникова. Письма в ЖЭТФ, 22, 516, 1975.

¹⁾Расчет показывает, что при $T = 4,2$ К и $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ вероятность экситон-экситонного соударения в Рь J_2 составляет 10^{12} сек^{-1} ,

- [4] R.F.Leheny, J.Shah. Phys. Rev. Lett., 38, 511, 1977.
- [5] K.I.Shaklee, R.E.Nahory, R.F.Leheny. J. Luminescence, 7, 284, 1973.
- [6] T.L.Reinecke, S.C.Ying. Solid State Electronics, 21, 1385, 1978.
- [7] R.M.Westervell. Phys. Stat. Sol. (b), 74, 727, 1976.
- [8] В.Е.Бисти, А.П.Силин. ФТТ, 20, 1850, 1978.
- [9] G.A.Thomas, J.B.Mock, M.Capizzi. Phys. Rev., B, 18, 4250, 1978.
-